

УДК 621.9.048.7 + 539.512.

**СТРУКТУРА БРОНЗ СИСТЕМ CU-AL И CU-AL-SI НАПЕЧАТАННЫХ МЕТОДОМ  
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Е.С. Хорошко, Н.Н. Шамарин, А.В. Филиппов

Научный руководитель: д.т.н. Е.А. Колубаев

Институт Физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

E-mail: [eskhoroshko@gmail.com](mailto:eskhoroshko@gmail.com)

**STRUCTURE OF BRONZE SYSTEMS CU-AL AND CU-AL-SI PRINTED BY ELECTRON BEAM  
ADDITIVE MANUFACTURING**

E.S. Khoroshko, N.N. Shamarin, A.V. Filippov

Scientific Supervisor: Dr. E.A. Kolubaev

Institute for Physics of Strength and Material Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

Russia, Tomsk, 2/4 Akademicheskii ave., 634055

E-mail: [eskhoroshko@gmail.com](mailto:eskhoroshko@gmail.com)

**Abstract.** *In this paper, we consider the features of the formation of structures in the bronze systems copper-aluminium, copper-aluminum-silicon, which are formed as a result of the multiwire technology of electron-beam additive manufacturing. Metallography was used to study typical structural elements. Research is focused on identifying grains of different phases in the longitudinal and cross sections of the samples. Based on the studies performed, differences in the structure and phase composition for the systems Cu-Al and Cu-Al-Si under consideration were established.*

**Введение.** Электронно-лучевая печать является бурно развивающимся направлением аддитивного производства разнообразных изделий для современной промышленности [1, 2]. Вместе с тем, на сегодняшний день отсутствует систематизированная информация о выборе технологических режимов и условий для формирования широкого круга металлов и сплавов, применяющихся в машиностроении, судостроении, авиации и ракетостроении. От выбранных режимов печати зависит структурное состояние напечатанных образцов. Изменяя тепловложение, можно добиться изменения размеров зерна и химического состава материала.

В судостроении и машиностроении широко применяются разнообразные медные сплавы. Алюминиевые бронзы используются в тех случаях, в которых необходимо обеспечить высокую коррозионную стойкость и защиту от износа элементов корпусов и механизмов. Вместе с тем, получение изделий из алюминиевой бронзы сопряжено с большими технологическими трудностями из-за высокой реакционной способности алюминия в расплаве. Следовательно, для получения качественных сплавов требуется рационально подбирать условия и режимы электронно-лучевой печати.

Целью данной работы является изучение особенностей формирования структур в бронзах систем медь-алюминий, медь-алюминий-кремний, которые образуются в результате печати тонкостенных образцов с

применением мультитрассовой технологии электронно-лучевого аддитивного производства. Исследования сосредоточены на выявлении зерен разных фаз в продольном и поперечном сечениях образцов.

**Экспериментальная часть.** Формирование медных сплавов систем Cu-Al и Cu-Al-Si осуществлялось методом электронно-лучевого аддитивного производства в ИФПМ СО РАН. Для получения сплавов использовались проволоки сплавов БрА7, БрКМц 3-1 и технически чистого алюминия. Печать осуществлялась с использованием двух трассовых подающих устройств. В зону печати проволоки подавались в соотношении 10:1 об. %, где 10 об. % это бронза, а 1 об. % – алюминий. Печать велась на стальной подложке с охлаждением стола. Металлографические исследования проводили для всех исследуемых образцов в продольном и поперечном сечениях, относительно траектории формирования слоев при 3D-печати. Для оценки содержания химических элементов использовался метод энергодисперсионного спектрального анализа.

**Результаты.** На рис. 1 представлены металлографические изображения структуры напечатанной алюминиевой бронзы системы Cu-Al в двух сечениях. Рассматриваемый образец содержит 23 ат. % алюминия, что по диаграмме фазовых состояний для системы Cu-Al указывает на формирование в основном зерен  $\beta$ -фазы. В нижней части образца наблюдается тонкая область (толщиной  $\sim 15$  мкм) на границе сплавления бронзы со стальной подложкой. Затем формируются зерна с неравномерной огранкой и средним размером порядка 150 мкм. В средней части сформировались вытянутые дендритные зерна шириной порядка 1-2 мм. По мере увеличения высоты стенки происходит увеличение ширины (вплоть до 5 мм) этих зерен.

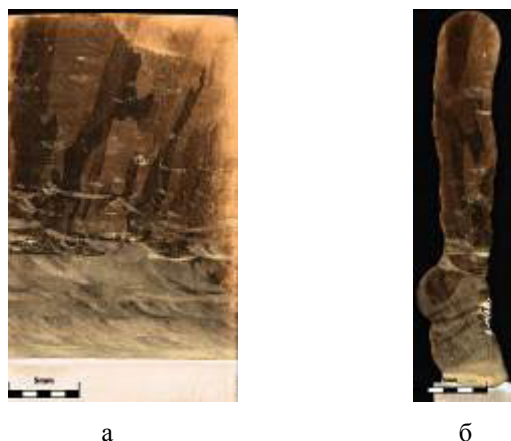


Рис. 1. Структура напечатанной алюминиевой бронзы Cu-23 ат. % Al  
в продольном (а) и поперечном (б) сечениях

На рис. 2 представлены металлографические изображения структуры напечатанной алюминиевой бронзы системы Cu-Al-Si в двух сечениях. Рассматриваемый образец содержит 9 ат. % алюминия, 5,5 ат. % кремния и 0,9 ат. % марганца, что по диаграмме фазовых состояний для системы Cu-Al-Si указывает на формирование в основном зерен  $\alpha$ -фазы. В нижней части образца сформировался толстый слой, состоящий из бронзы и большого количества интерметаллидов. В нижней части наблюдаются небольшие дендритные зерна шириной 100 мкм и длиной порядка 1 мм. В средней части стенки вместе с дендритами встречаются отдельные зерна почти равноосной формы со средним размером около 75 мкм. В верхней части повторяется картина, наблюдавшаяся в середине образца, но также произошло небольшое увеличение размеров зерен.



Рис. 2. Структура напечатанной алюминиевой бронзы  $\text{Cu-9 ат. \% Al - 5,5 ат. \% Si - 0,9 ат. \% Mn}$  в продольном (а) и поперечном (б) сечениях

По приведенным данным видно, что несмотря на различия в фазовом и химическом составе для рассматриваемых образцов имеется общая тенденция, заключающаяся в увеличении размеров зерна в верхних слоях напечатанных стенок. Это связано с особенностями изменения теплоотвода при печати разных по высоте слоев в условиях вакуума и применения водоохлаждаемого стола. В нижних слоях кристаллизация происходит быстрее за счет более интенсивного охлаждения и в результате формируются более мелкие зерна. В верхних слоях происходит более значительный разогрев материала из-за этого увеличивается размер ванны расплава и области термического нагрева. В результате кристаллизация происходит медленнее и начинается процесс собирательной кристаллизации, который способствует более направленному формированию дендритных зерен и увеличению их размеров в направлении преимущественного роста. Также общим фактом является отсутствие дефектов в виде пор или трещин, типичных для материалов, полученных методами аддитивного производства.

**Закключение.** В результате проведенных исследований установлено, что в процессе электронно-лучевой печати могут быть сформированы тонкостенные образцы бронз систем Cu-Al и Cu-Al-Si с бездефектной структурой. На основе выполненных исследований установлены различия в структуре и фазовом составе для рассматриваемых систем. Применение мультитипроволочной технологии позволяет добиться формирования бронз разного химического и фазового состава, что открывает большие возможности для использования этой технологии в современном машиностроении. Дальнейшим направлением работы является исследование эксплуатационных свойств (износостойкости и коррозионной стойкости) рассматриваемых образцов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90130.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wolf T, Fu Z, Körner C. Selective electron beam melting of an aluminum bronze: Microstructure and mechanical properties. // Materials Letters. – 2019. – Vol. 238. – P. 241–244.
2. Pobel R., Lodes M.A., Körner C. Selective Electron Beam Melting of Oxide Dispersion Strengthened Copper // Advanced Engineering Materials – 2018. – Vol. 20. – P. 1–7.